# 論文 ポリマーセメントモルタルと既存コンクリート界面の付着特性にお ける界面粗度の影響

尾崎 宏喜<sup>\*1</sup>·古内 仁<sup>\*2</sup>

要旨:ポリマーセメントモルタル(以下 PCM)を用いた下面増厚工法により補強された部 材は、載荷状況によっては増厚端部からの剥離を伴う破壊性状を示す。本研究では、コンク リート要素試験体をはつり施工した後、PCM を吹付け施工し供試体を作製した。実験変数 を PCM の静弾性係数および接着界面の粗度として、鉛直方向付着試験と一軸せん断付着試 験を行った。実験により得られた結果から、各実験変数と鉛直方向付着強度およびせん断付 着強度との相関を示した。

キーワード:ポリマーセメントモルタル,下面増厚工法,界面粗度,せん断付着強度

#### 1. はじめに

近年ますます土木構造物の維持・補修が重要 視されている。補修・補強を行うにあたり、土 木構造物は建設されている地域の生活において 重要な役割を果たしているものが多く、一時的 にせよ使用が制限されてしまうと利用者に多大 な影響を与えうるものである。

本研究で着目しているポリマーセメントモル タル下面増厚工法は、橋梁等の床版に補修・補 強を行う際に交通規制を必要とせず, 天候に左 右されることなく施工が行えるという利点を持 つ。また, PCM の性能の向上に伴い, 湿式吹付 け工法による下面増厚補強が注目され、新幹線 高架軌道スラブや自動車専用道路の高架橋床版 等で施工事例が増加している。PCM 下面増厚補 強は、補強される既存構造部材の形式や形状に よる制限から増設する鉄筋の定着をとることは 困難であるため、モルタル自身の高い接着性を 利用して一体化させることを前提としている。 そのため,構造物を長期間供用する中で増厚モ ルタルの剥離が懸念される。既往の研究<sup>1)</sup>によ れば、下面増厚補強された RC はりの増厚モルタ ル端部から剥離が起こり易く、その剥離はコン クリートとモルタルの界面に作用するせん断応 力が支配的であるという報告がされている。モ ルタルと既存コンクリート界面の付着は、モル タル自身の化学的付着作用と既設コンクリート はつり面の幾何学的な形状(凹凸面)による機 械的付着作用からなる。ポリマーセメントモル タルと既存コンクリート界面のせん断付着性状 に着目した代表的な研究としては、佐藤らの研 究<sup>2)3)</sup>があるが補強筋とモルタルが一体化した 増厚部材のせん断付着特性とコンクリート表面 粗度の関係に着目したものはほとんどない。

本研究では,現場施工を想定した表面処理方 法であるウォータージェット工法とサンドブラ スト工法を実施し,既存コンクリート面の粗度 を主変数とした要素試験体を用いた実験から基 礎データを収集し,表面粗度が付着特性に与え る影響を検討した。

#### 2. 実験概要

実験では、既存コンクリート表面の粗度と PCMの静弾性係数を変数とし、鉛直方向付着試 験と一軸せん断付着試験の2種類の実験を行っ た。各実験の供試体をパラメータごとに2体ず つ用意した。試験の詳細を以下に示す。

## 2.1 鉛直方向付着試験

JIS A 1171 ポリマーセメントモルタルの試験 方法に準じて,鉛直方向付着強度(接着強さ)

\*1 北海道大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

\*2 北海道大学大学院 工学研究科助手 工博 (正会員)

を調べた。試験装置には建研式接着力試験器を 用い,接着面に対し垂直方向に引張力を静的に 作用させ,鉛直方向付着強度を求めた。

## 2.2 一軸せん断付着試験

一軸せん断付着試験の概要を図-1に示す。
既存コンクリート部に見立てたコンクリート直
方体(100×100×250)を2体用意し,両側面を
はつり施工し格子状補強筋(SD295 D10,格子間
隔 50mm)を設置した後,PCMを厚さ30mm,
幅 30mm で増厚一体化した。試験定着長は
210mmであり,1供試体につき4区間存在する。
一軸引張試験機のチャックで両側のつかみ棒

(D16 異形棒鋼)を固定し軸方向に引張力を与 えることで,コンクリートと PCM 増厚部界面に 面内せん断力を作用させた。本実験で測定した 項目は,荷重,コンクリート部と増厚部 PCM の 相対変位,鉄筋及び PCM のひずみである。ひず みゲージは,50mm 間隔で格子状補強筋及び PCM 表面に貼り付けた。

## 2.3 使用材料

コンクリートには,普通ポルトランドセメン ト,天然の粗骨材(最大寸法 20mm)および細骨 材を使用し,材齢 28 日における圧縮強度は 44.2N/mm<sup>2</sup>である。PCMは,セメント,細骨材, 再乳化型粉末樹脂,アクリル繊維,各種混和材 料をあらかじめ配合したポリマー系吹付け材料 で,静弾性係数の異なる2種類を用意した。PCM の材料特性(材齢28日)を表-1に示す。増厚材 の施工方法は,30mmの厚さを1回の吹付け施 工で行い,また,急結性を示さないためPCM表 面は通常の左官作業で仕上げを行った。

#### 2.4 表面粗度

本実験の変数である界面粗度に変化を与える ため、はつり施工は Sand Blast 工法(目標はつ り深さ 1mm,以下 SB と表記),Water Jet-1 工 法(同 3mm,以下 WJ1),Water Jet-2 工法(同 10mm,以下 WJ2)の3種類を行った。なお、各 工法は、それぞれ所定のはつり深さになるよう ブラストの投射量および投射時間、ウォーター ジェット工法の水圧,施工時間を調整しながら

表一1 PCM の材料特性

PCM 種類	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弹性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
PCM-E <sub>1</sub>	24.3	3.10	$1.43 \times 10^{4}$
PCM-E <sub>2</sub>	29.4	4.53	$2.57 \times 10^4$

注) 圧縮強度は実測値, 引張強度と静弾性係数は規格値



図-2 界面はつり状況

はつり深さ:10mm

## 施工が行なわれた。

表面粗度を定量的に評価するため,別途用意 した粗度測定用供試体のはつり面を触針式 3 次 元計測器により面積 6400mm<sup>2</sup> (80×80mm)対し *x*, *y* 方向に 0.2mm 間隔で計測した。測定データ より 3 次元画像化したものを図-2に示す。

# 3. 計測及び実験結果

# 3.1 表面粗度定量化

計測により得られた 3 次元データを既往の研 究からせん断付着強度と関係が深いと報告<sup>4)</sup>さ れている以下の指標を用いて定量化した。各表 面粗度の指標値を**表-2**に示す。

#### (1) 表面積の変化率

表面処理前後の面積を比較し、その変化率に より凹凸形状の著しさを数値化した。変化率が 高いものほど凹凸の変化が大きく、表面が粗い ものをあらわしている。

$$H = \frac{A_{after}}{A_{before}} \tag{1}$$

ここに、H:表面積変化率  

$$A_{before}$$
:表面処理前の面積  
 $A_{after}$ :表面処理後の面積  
 $(=\overline{L}_x \times \overline{L}_y)$   
 $L_x = \sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta z_i^2}$   
 $L_y = \sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta y_i^2 + \Delta z_i^2}$   
 $\Delta x_i, \Delta y_i$ :測定間隔  
 $\Delta z_i$ :深さの差  
 $\overline{L}_x, \overline{L}_x$ : x, y方向の累計距離

## (2) 算術平均粗さ

JIS B 0601 粗さ形状パラメータに準じた方法 で,基準線と粗さ曲線で囲まれた面積を基準長 さ*L*で除した値をいう(図-3参照)。一つの突 出した値が測定値に及ぼす影響が非常に小さく なり,安定した結果が得られる。

## 表-2 表面粗度指標

	表面変化率 <i>H</i>	算術平均粗さ <i>R<sub>a</sub></i> (×10 <sup>4</sup> µ m)
SB	1.07	0.33
WJ1	1.20	1.10
WJ2	1.40	2.73

# 表-3 鉛直方向付着強度

鉛直方向付着強度 $\sigma_{max}$ (N/mm <sup>2</sup> )						
	$PCM-E_1$		$PCM-E_2$			
	No.1	No.2	No.1	No.2		
SB	1.75	1.79	1.02	2.05		
WJ1	2.56	2.80	2.35	2.65		
WJ2	2.29	2.43	_	1.85		



#### 図-3 算術平均粗さ

$$R_{a} = \frac{1}{L} \int_{0}^{L} |f(x)| \, dx \tag{2}$$

ここに, *R<sub>a</sub>*:算術平均粗さ *L*:基準長さ *f*(*x*):粗さ曲線

#### 3.2 鉛直方向付着試験結果

全ての供試体はPCM 増厚部とコンクリート界 面で破壊した。各供試体の鉛直方向付着強度を 表-3に示す。SBとWJ1を比較すると表面粗度 が大きいWJ1の方が鉛直方向付着強度は大きい ことがわかる。最も粗度の大きいWJ2では、WJ1 よりも鉛直方向付着強度が低下することが示さ れた。

# 3.3 一軸せん断付着試験結果

全ての供試体はPCM 増厚部とコンクリート界 面で剥離する破壊形態になった。表面粗度が大 きい供試体は既存部コンクリート側にPCM が若 干付着しているが,PCM 自体の破壊ではないと 判断した。

## 4. 考察

## 4.1 鉛直方向付着強度と表面粗度の関係

各供試体の鉛直方向付着強度と表面粗度の関 係を図-4に示す。値は同一変数供試体の平均 値を示した。鉛直方向付着強度は、表面積変化 率(または算術平均粗さ)とともに増加してい るが, H=1.2 (または Ra=1.1×10<sup>4</sup>  $\mu$  m) 以降で 強度の低下が見られる。これは、 粗度が増加す るにつれて、付着領域が増加し見かけ上の付着 強度が増加することと表面の凹凸による機械的 抵抗作用が増加する一方で、露出した粗骨材が 不安定になる割合が増加するためであると考え られる。はつり施工は、Sand Blast 工法と Water Jet 工法によるものであり,既存コンクリートの界 面にはブラスト投射や水圧による衝撃力が加え られている。そのため、はつり面から大きく露 出した粗骨材はゆるんだ状態となり、付着に対 する抵抗性は期待できないものと考えられる。 試験後の破壊面の観察から、粗度が小さい場合 は、径の小さな粗骨材が、粗度が大きくなるに つれて径の大きい粗骨材が PCM 側に付着してい ることが確認された。したがって, 強度を低下 させる機構は、はつり深さと粗骨材の最大寸法 との相対的な関係にあると推察される。

静弾性係数の違いに着目すると,静弾性係数 が高いほうが全般的に鉛直方向付着強度は小さ くなる傾向が示された。

## 4.2 せん断付着強度について

## (1) 增厚材断面力

PCM 表面に貼ったゲージから得られたひずみの履歴の一例を図-5に,鉄筋のひずみ履歴の



図-5 PCM 表面のひずみ履歴



図-4 鉛直方向接着強度と表面粗度の関係

一例を図-6に示す。PCM 表面のひずみは載荷 初期段階では引張を示しているが,終局に近づ いてくると圧縮に転じている。一方,鉄筋は終 局状態まで引張を示している。そこで,PCM 断 面のひずみ分布を図-7に示すように仮定した。 鉄筋とモルタルが一体化しているとき(引張力 が小さいとき)は内部のモルタルのひずみと鉄 筋のひずみが等しいと仮定できるが,ある程度 以上の大きさになると鉄筋の界面ですべりが生 じてモルタルのひずみは頭打ちになると考えら れる。ここでモルタルの限界ひずみは,試験区 間の端部(ゲージ記号 d,fの位置)において増厚 部の引張力の合計が外力と釣り合うものと仮定 して求めた。具体的には,PCM の引張限界ひず





 $<sup>\</sup>varepsilon_m', \varepsilon_m : \text{PCM} のひずみ$ 

€lim:鉄筋位置における PCM の引張限界ひずみ

## 図-7 鉛直方向接着強度と表面粗度の関係

み $\varepsilon_{lim}$  (仮定)を  $10 \mu$  ずつ変動させ,載荷初期から破壊までのどのレベルに対しても外力に近似する時の値を PCM の限界ひずみと定義した。図 -8は,試算結果の一例であるが,PCM の種類にかかわらず引張限界ひずみは全ての供試体で共通であるものとして  $100 \mu$  という値が得られた。この仮定を増厚部全ての測定箇所に適用し増厚材断面力を求めた。

## (2) せん断付着強度の推定

増厚材断面に作用した引張力分布からPCMと コンクリート界面の局所的なせん断付着応力を 次式により求めた。

$$\tau = \frac{\Delta P}{b \cdot \Delta l} = \frac{P_i - P_{i-1}}{b \cdot \Delta l}$$
(3)

ここに、 $\tau$ : せん断付着応力 (N/mm<sup>2</sup>)  $\Delta P$ :  $\Delta l$  における引張力の変動量(N) b: 付着幅 (mm)  $\Delta l$ : 局所付着長さ (mm)

なお、 $P_i$ および $P_{i-1}$ は、着目した区間(局所付 着長さ $\Delta l$ )の両端における増厚材の引張力で、 図-7により仮定したPCMひずみ分布から求め た引張力と鉄筋に作用する引張力の合計である。 得られたせん断付着応力分布より、破壊領域に おける最大値をせん断付着強度 $\tau_{max}$ と定義した。 各供試体の $\tau_{max}$ を表-4に示す。

# 4.3 せん断付着強度と表面粗度の関係

各供試体のせん断付着強度と表面粗度の関係



# 図-8 増厚部の引張力と外力のつりあい

表-4 せん断付着強度



図-9 せん断付着強度と表面粗度の関係

を図-9に示す。供試体の各試験区間粗度面は, 厳密には凹凸が一定ではないために局所的な部 分で見たせん断付着強度にばらつきが見られた が,相関関係があると見なし同一変数供試体の 平均値を示した。静弾性係数の違いに着目する と,鉛直方向付着強度の傾向と異なり PCM の静 弾性係数が高い供試体では全般的に *τ*max が大き

い。また,静弾性係数が高い PCM-E2 供試体では, 粗度の増加に伴って $\tau_{max}$ の増加が見られるが, 静弾性係数の低い PCM-E1 供試体では鉛直方向 付着強度の傾向と同様に H=1.2(または Ra=1.1 ×10<sup>4</sup> $\mu$ m) 以降では $\tau_{max}$ が低下している。この 原因としては,鉛直方向付着強度と同様に母材 コンクリートのモルタルと粗骨材界面における 付着の低下によるものと考えられる。ただし、 せん断応力下では,お互いの材料の凸部でのか み合わせ機構により凸部には支圧力が作用して いることから,材料の圧縮強度に支配されてい ると考えられる。本実験では、圧縮強度はコン クリートに比べて PCM の方が小さく, さらには 静弾性係数の違う PCM では, 圧縮強度も異なっ ている。PCM-E1の供試体では H=1.2 でせん断付 着強度のピークが得られたが、静弾性係数が大 きく圧縮強度も大きい PCM-E<sub>2</sub>では PCM-E<sub>1</sub>に比 べてもう少し大きい表面粗度でピークが存在す る可能性がある。今後, データの蓄積を行うこ とでせん断付着強度に対する静弾性係数と表面 粗度の相関関係を明らかにする必要がある。

## 5. まとめ

- (1) JIS A 1171 ポリマーセメントモルタルの試 験方法に準じた実験から, 鉛直方向付着強度 を求めた。鉛直方向付着強度は, 表面粗度と ともに増加しているが, 表面積変化率 H が 1.2 (算術平均粗さ Ra が 1.1×10<sup>4</sup> µ m) 以降 で強度の低下が見られた。この理由として, 粗度が増加するにつれて, 付着領域が増加し 見かけ上の付着強度が増加することと表面 の凹凸による機械的抵抗作用が増加する一 方で, 露出した粗骨材が不安定になる割合が 増加するためであると考えられる。
- (2) 鉛直方向付着強度は、PCM の静弾性係数が 大きい方が全般的に小さくなる傾向がある ことが示された。
- (3) コンクリートと PCM 増厚部界面の一軸せん 断付着試験の結果から,局所的なせん断付着 強度を求めた。粗度の増加に伴ってせん断付

着強度の増加が見られるが, PCM の静弾性 係数が低い供試体では表面積変化率が 1.2

(算術平均粗さが  $1.1 \times 10^4 \mu$  m) 以降ではせ ん断付着強度が低下した。PCM の静弾性係 数が大きい供試体では, せん断付着強度の低 下が見られなかったが, 粗度がもう少し大き いところにせん断付着強度のピークが存在 する可能性がある。

(4) せん断付着強度は, PCM の静弾性係数の大 きい方が全般的に大きくなる傾向があるこ とが示された。

#### 謝辞

本研究において, コンクリートはつり施工を 行うにあたり, ウォータージェット工法では, (株)苫小牧清掃企業組合 本間裕章氏, (有)島田 塗装店 長谷川泰則氏, サンドブラスト工法では (株)マイティー 草木均氏, からの多大なご助力 を得ました。また, ポリマーセメントモルタル の吹付け施工では, (株)デグサコンストラクシ ョンシステムズ 吉住彰氏のご協力をいただき ました。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 恒岡聡,古内仁,角田與史雄,吉住彰:吹付 けモルタルを用いた下面増厚補強 RC 部材に おけるモルタルの剥離挙動について、コンク リート工学年次論文集, Vol.24,No.2,2002
- 佐藤貢一,小玉克己:ポリマーセメントモル タル増厚補強部材の付着界面せん断剥離性 状に関する研究,土木学会論文集,No.732/ V-59,77-87,2003.5
- 3) 佐藤貢一,小玉克己:ポリマーセメントモル タル増厚補強した RC はりの剥離破壊性状に 関する基礎的研究,土木学会論文集 No.746/ V-61,115-128,2003.11
- 4) 松田浩:3次元形状計測による境界適合型3 次元ソリッドシェル複合解析システムの開発,研究課題番号11555118,基盤研究(B)(2) 研究成果報告書,平成13年3月